

# PERBANDINGAN PENGGUNAAN DATA HUJAN LAPANGAN DAN DATA HUJAN SATELIT UNTUK ANALISIS HUJAN-ALIRAN MENGGUNAKAN MODEL IHACRES

**Reza Ahmad Fadhli<sup>1)</sup>, Bambang Sujatmoko<sup>2)</sup>, Sigit Sutikno<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

<sup>2)</sup>Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

Kampus Bina Widya Jln. HR Soebrantas KM 12.5 Pekanbaru, Kode Pos 28293

Email: rezahmadf@yahoo.co.uk

## *Abstract*

*This study conducted an analysis of satellite rainfall data utilization as an alternative for hydrological modeling. Reliability of satellite rainfall data for hydrological modeling is compared to the use of ground rainfall data. Rainfall-runoff modeling in this research is used IHACRES program by taking a case study in the Rokan watershed, Riau Province. IHACRES model output was compared and analyzed with the output of IFAS simulation. The length of the data used was four years (2003 - 2006) with the variation in the length of data scheme 1 (three year calibration), Scheme 2 (two years calibration) and scheme 3 (one year calibration). The results showed that the use of satellite rainfall data for rainfall-runoff modeling IHACRES is better than using ground rainfall data based on the evaluation of the model accuracy coefficient of efficiency (CE). Such thing was reviewed by assessing the CE parameters that have better value, while the parameters R and VE have relatively similar results. CE value of ground rainfall data scheme 1, Scheme 2 and scheme 3 is 0,659; 0,715 and 1,003. CE value of satellite rainfall data 0,924 and 0,875. In general, based on the CE value of the parameter evaluation accuracy simulation step, the rainfall-runoff modeling IFAS using satellite rainfall data are more reliably than the rainfall-runoff modeling IHACRES that uses ground rainfall data and satellite, the value of CE rainfall-runoff modeling IFAS is 1,652.*

*Keywords: ground rainfall data, IFAS, IHACRES, rainfall-runoff modeling, satellite rainfall data*

## **A. PENDAHULUAN**

Ketersediaan air suatu Daerah Aliran Sungai (DAS), mencerminkan proses pergerakan air dari vegetasi, tanah dan sungai yang berlangsung secara tetap. Pergerakan air ini dapat dideteksi dan didekati dengan beberapa persamaan matematika. Persamaan tersebut mencerminkan proses pengalihragaman dari hujan menjadi aliran yang dapat ditiru dan disederhanakan serta diwujudkan dalam bentuk model, yang disebut dengan model hujan-aliran. Model hujan-aliran (*rainfall-runoff*) digunakan untuk memprediksi nilai *runoff* harian maupun bulanan yang didasarkan pada data hujan, penguapan serta karakteristik parameter DAS.

Salah satu model hujan-aliran yang cukup dikenal dan banyak diaplikasikan negara di dunia oleh para praktisi dan peneliti adalah model IHACRES. Model *Identification of Unit Hydrograph and Component Flow from Rainfall, Evaporation and Stream Flow Data* (IHACRES) dikembangkan di Inggris, dengan mendeskripsikan hujan-aliran menjadi dua sub proses yakni sub proses vertikal yang digambarkan oleh *Non Linear Loss Module* dan sub proses lateral yang diimplementasikan melalui *Linear Unit Hydrograph Module* (Indarto, 2010).

Namun karena keterbatasan terhadap kelengkapan, keakuratan data menjadi penyebab kesulitan untuk menganalisis

suatu model hidrologi, maka dirasa perlu menggunakan data satelit (data hujan satelit) sebagai alternatif untuk pemodelan hidrologi. Dalam upaya memperoleh data satelit ini, dibantu dengan *software* IFAS.

Penggunaan data hujan satelit sebagai data alternatif untuk pemodelan hidrologi perlu dibandingkan dan dianalisis dengan penggunaan data hujan lapangan pada model hujan-aliran IHACRES. Hal ini dilakukan agar mengetahui apakah data hujan satelit sebagai data alternatif dapat dijadikan data cadangan dalam pemodelan hidrologi. Kemudian dibandingkan dan dianalisis dengan debit keluaran model hujan-aliran lainnya, yakni *Integrated Flood Analysis System* (IFAS) ver.1.3.0 dengan *2 layer tank engine* (mode standar) dalam Mardhotillah (2013).

Dari latar belakang yang telah dipaparkan di atas, maka yang menjadi rumusan masalah pada penelitian ini adalah sejauh mana keakuratan data hujan satelit sebagai data alternatif dalam pemodelan hidrologi menggunakan IHACRES yang diaplikasikan di daerah Riau khususnya di stasiun duga air Lubuk Bendahara, Kecamatan Rokan IV Koto, Kabupaten Rokan Hulu, Provinsi Riau. Bagaimana keandalan model IHACRES ver.2.1.2 dan model IFAS ver.1.3.0 dengan *2 layer tank engine* (mode standar) dengan membandingkan dan menganalisis *output* masing – masing model berdasarkan ketelitian model masing-masing *output*.

## 1. IHACRES

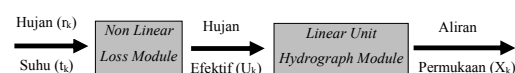
Ketersediaan air suatu Daerah Aliran Sungai (DAS), mencerminkan proses pergerakan air dari vegetasi, tanah dan sungai yang berlangsung secara tetap. Pergerakan air ini dapat dideteksi dan didekati dengan beberapa persamaan matematika. Persamaan tersebut mencerminkan proses pengalihragaman dari hujan menjadi aliran yang dapat ditiru dan disederhanakan serta diwujudkan dalam bentuk model, yang disebut dengan model hujan aliran.

Salah satu model hujan aliran yang cukup dikenal dan banyak diaplikasikan di

beberapa negara di dunia oleh para praktisi dan peneliti adalah model IHACRES. IHACRES telah berhasil diterapkan untuk menyelidiki respon hidrologi di berbagai DAS di seluruh dunia seperti di Australia (Carlile, *et al*, 2004), Afrika Selatan (Dye dan Croke, 2003), Amerika Serikat (Anderson dan Goodall, 2006), Inggris (Croke dan Littlewood, 2005), Thailand (Sriwongsitanon dan Taesombat, 2011) dan Indonesia (Indarto, 2006).

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Indarto (2006), bahwa model IHACRES yang pada awalnya dikembangkan di Inggris, telah berhasil dalam menyelidiki respon hidrologi di DAS Bedadung, Jawa Timur. Dengan adanya keberhasilan tersebut, maka dirasa perlu untuk mencoba keandalan model IHACRES di daerah lain di Indonesia.

Model IHACRES (*Identification of Unit Hydrograph and Component Flows from Rainfall, Evaporation and Stream Flow Data*) menurut Croke dan Jakeman (Wheater, *et al*, 2008) merupakan gabungan dari model konseptual dan model matrik dengan melakukan penyederhanaan terhadap model matrik untuk mengurangi ketidakpastian parameter yang melekat dalam model hidrologi, sementara pada saat yang sama berusaha mewakili proses internal lebih detail dibandingkan dengan model matrik. Proses hidrologi menurut konsep IHACRES disederhanakan sebagai berikut:



Gambar 1. Deskripsi Proses Hujan Aliran Menurut IHACRES

(Sumber: Indarto, 2010)

Berdasarkan Gambar 1, siklus hidrologi menurut IHACRES dibedakan menjadi dua. Sub proses vertikal yang digambarkan oleh *Non Linear Loss Module* dan sub proses lateral yang diimplementasikan melalui *Linear Unit Hydrograph Module*. *Non linear loss module* berfungsi untuk mengkonversi hujan menjadi hujan efektif.

Proses *non linear loss module* merupakan proses perubahan hujan menjadi aliran permukaan pada skala DAS diasumsikan bersifat *non linear*. Kinerja *non linear loss module* ditentukan oleh kondisi DAS atau kadar air pada permukaan tanah. Perhitungan curah hujan efektif ( $u_k$ ) menurut Ye *et al* dalam Sriwongsitanon dan Taesombat (2011) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$u_k = [c(\phi_k - l)]^p r_k$$

$$\phi_k = r_k + \left(1 - \frac{l}{\tau_k}\right) \phi_{k-1}$$

$$\tau_k = \tau_w e^{(0,062 f(t_r - t_k))}$$

Dengan  $u_k$  adalah curah hujan efektif (mm),  $r_k$  adalah curah hujan terukur (mm),  $c$  adalah keseimbangan massa ( $\text{mm}^{-1}$ ),  $l$  adalah indeks ambang batas kelembaban tanah untuk menghasilkan aliran,  $p$  adalah respon jangka waktu *non linear*. Parameter  $l$  dan  $p$  hanya digunakan untuk DAS yang bersifat sementara (*ephemeral*),  $\phi_k$  adalah kelembaban tanah (mm),  $\tau_k$  adalah laju pengeringan,  $t_k$  adalah temperatur terukur ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\tau_w$  adalah laju pengeringan pada saat suhu referensi. Parameter ini mempengaruhi variasi drainase tanah dan laju infiltrasi,  $f$  adalah modulasi temperatur ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). Parameter ini berkaitan dengan variasi evapotranspirasi musiman yang dipengaruhi oleh iklim, tata guna lahan dan penutup lahan, dan  $t_r$  adalah temperatur referensi ( $^{\circ}\text{C}$ ).

IHACRES ver.2.1 lebih umum dibandingkan versi aslinya yaitu ver.1.0. Namun pengguna dapat beralih dari ver.2.1 ke vers.1.0 dengan mengganti parameter  $l$  dan  $p$  masing-masing menjadi nol dan satu.

Dalam modul linear, curah hujan efektif diubah menjadi limpasan menggunakan hubungan linear. Ada dua komponen yang berpengaruh di dalam aliran yakni aliran cepat (*quick flow*) dan aliran lambat (*slow flow*). Kedua komponen tersebut dapat dihubungkan baik secara paralel maupun seri. Direkomendasikan menggunakan dua komponen tersebut

secara paralel, kecuali untuk daerah semi kering ataupun sungai *ephemeral* dimana salah satu komponen biasanya memadai (Sriwongsitanon dan Taesombat, 2011).

Konfigurasi paralel dari kedua komponen dalam kondisi waktu  $k$  untuk aliran cepat ( $x_k^{(q)}$ ) dan aliran lambat ( $x_k^{(s)}$ ) yang dikombinasikan untuk menghasilkan limpasan ( $x_k$ ) disajikan dalam rumusan berikut (Sriwongsitanon dan Taesombat, 2011) :

$$x_k = x_k^{(q)} + x_k^{(s)}$$

$$x_k^{(q)} = -\alpha_q x_{k-1}^{(q)} + \beta_q u_k$$

$$x_k^{(s)} = -\alpha_s x_{k-1}^{(s)} + \beta_s u_k$$

dengan  $x_k$  adalah limpasan atau debit (mm),  $x_k^{(q)}$  adalah aliran cepat (mm),  $x_k^{(s)}$  adalah aliran lambat (mm),  $\alpha_q$  adalah angka resesi untuk aliran cepat,  $\alpha_s$  adalah angka resesi untuk aliran lambat,  $\beta_q$  adalah respon puncak untuk aliran cepat, dan  $\beta_s$  adalah respon puncak untuk aliran lambat.

Karakteristik respon dinamis (*Dynamic Response Characteristics*, DRCs) merupakan ukuran numerik yang berasal dari curah hujan, evapotranspirasi (ataupun suhu) dan debit sungai dari serangkaian DAS. Adapun karakteristik respon dinamis untuk aliran cepat dan lambat dapat dihitung menggunakan rumus berikut (Sriwongsitanon dan Taesombat, 2011):

$$\tau_q = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_q)}$$

$$\tau_s = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_s)}$$

Dengan  $\Delta$  adalah kurun waktu,  $\tau_q$  adalah konstanta waktu respon cepat (hari) dan  $\tau_s$  adalah konstanta waktu respon lambat (hari).

Volume perbandingan untuk aliran cepat dan aliran yang lambat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$v_q = \frac{\beta_q}{1 + \alpha_q} = 1 - v_s = 1 - \frac{\beta_s}{1 + \alpha_s}$$

Dengan  $v_q$  adalah volume perbandingan untuk aliran cepat dan  $v_s$  adalah volume perbandingan untuk aliran lambat.

Model IHACRES memiliki enam parameter model tiga diantaranya berkaitan dengan *non linear loss module* yaitu  $\tau_w$ ,  $f$  dan  $c$  serta tiga parameter berikutnya berkaitan dengan *linear unit hydrograph module* yaitu  $\tau_q$ ,  $\tau_s$  dan  $v_s$ . Keenam parameter model tersebut dianggap sebagai upaya karakterisasi yang unik dan efisien dari proses hidrologi pada sebuah DAS.

## 2. Evaluasi Ketelitian Model

Evaluasi ketelitian model IHACRES dalam Croke *et al* (2004) menggunakan fungsi objektif yang terdiri dari:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Q_o - Q_m)^2}{\sum (Q_o - \bar{Q}_o)^2}$$

$$Bias = \frac{\sum (Q_o - Q_m)}{n}$$

Dengan  $Q_o$  adalah debit terukur ( $m^3/detik$ ),  $Q_m$  adalah debit terhitung ( $m^3/detik$ ) dan  $n$  adalah jumlah sampel.

Dalam penelitian ini, indikator statistik yang paling utama dalam menentukan keandalan model adalah  $R^2$  dan bias. Kedua indikator statistik tersebut dirasa cukup dalam mengevaluasi kinerja model dalam hal membandingkan antara hasil model dengan data yang diamati. Nilai optimal untuk  $R^2$  mendekati satu dan bias mendekati nol. Perumusan persamaan  $R^2$  didasarkan pada indikator efisiensi model Nash-Sutcliffe (Croke, *et al*, 2005). NSE memiliki *range* antara  $-\infty$  sampai dengan 1. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Motovilov *et al* (1999), NSE memiliki beberapa kriteria seperti yang diperlihatkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Kriteria Nilai Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)

Nilai NSE	Interpretasi
$NSE > 0,75$	Baik
$0,36 < NSE < 0,75$	Memenuhi
$NSE < 0,36$	Tidak memenuhi

(Sumber: Motovilov, *et al*, 1999)

Selain evaluasi ketelitian model  $R^2$  dan Bias pada penelitian ini menggunakan evaluasi ketelitian model tambahan, yakni koefisien korelasi ( $R$ ), selisih volume (VE) dan koefisien efisiensi (CE). Koefisien korelasi ( $R$ ) adalah nilai yang menunjukkan besarnya keterkaitan antara nilai debit terukur dengan debit model.

$$R = \frac{\sum (Qm_i - \bar{Q}_m)(Qo_i - \bar{Q}_o)}{\sqrt{\sum (Qm_i - \bar{Q}_m)^2 \times \sum (Qo_i - \bar{Q}_o)^2}}$$

Dengan  $\bar{Q}_o$  adalah rerata debit terukur ( $m^3/detik$ ) dan  $\bar{Q}_m$  adalah rerata debit terhitung ( $m^3/detik$ ).

Koefisien korelasi ( $R$ ) memiliki beberapa kriteria seperti pada Tabel 2 berikut ini:

Tabel 2. Kriteria Nilai Koefisien Korelasi

Nilai Koefisien Korelasi (R)	Interpretasi
$0,7 < R < 1,0$	Derajat asosiasi tinggi
$0,4 < R < 0,7$	Hubungan substansial
$0,2 < R < 0,4$	Korelasi rendah
$R < 0,2$	Diabaikan

(Sumber: Hambali, 2008)

Selisih volume atau *volume error* (VE) aliran adalah nilai yang menunjukkan perbedaan volume perhitungan dan volume terukur selama proses simulasi. Selisih volume (VE) aliran dikatakan baik apabila dapat menunjukkan angka tidak lebih dari 5%. Perhitungan selisih volume (VE) dirumuskan sebagai berikut:

$$VE = \left| \frac{\sum_{i=1}^N Qo_i - \sum_{i=1}^N Qm_i}{\sum_{i=1}^N Qo_i} \right| \times 100\%$$

Koefisien Efisiensi (CE) adalah nilai yang menunjukkan efisiensi model terhadap debit terukur. Perhitungan Koefisien Efisiensi (CE) dirumuskan sebagai berikut:

$$CE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (Qo_i - Qm_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Qo_i - \bar{Q}_o)^2} \right]$$

Koefisien efisiensi memiliki beberapa kriteria seperti terlihat pada Tabel. 3 berikut ini:

Tabel 3. Kriteria Nilai Koefisien Efisiensi

Nilai Koefisien Efisiensi (CE)	Interpretasi
$CE > 0,75$	Optimasi sangat efisien
$0,36 < CE < 0,75$	Optimasi cukup efisien
$CE < 0,36$	Optimasi tidak efisien

(Sumber: Hambali, 2008)

### 3. Kalibrasi Model

Kalibrasi model menurut Vase, *et al* (2011) merupakan suatu proses mengoptimalkan atau secara sistematis menyesuaikan nilai parameter model untuk mendapatkan satu set parameter yang memberikan estimasi terbaik dari debit sungai yang diamati.

Dalam penelitian ini, pada tahap kalibrasi dilakukan pemilihan periode kalibrasi dan periode *warm up*. Menurut Littlewood, *et al* (1999). *Warm-up* adalah periode untuk inisiasi dan dicari dengan coba-coba.

Pemilihan periode *warm up* bertujuan untuk mengisi kondisi awal DAS. Kalibrasi model pada penelitian ini menggunakan kalibrasi secara maju dan kalibrasi mundur.

Kalibrasi maju adalah kalibrasi yang menggunakan data tiga tahun pertama (2003, 2004 dan 2005) untuk proses kalibrasi, kemudian sisa panjang data (2006) digunakan untuk tahapan verifikasi.

Sedangkan kalibrasi mundur adalah kalibrasi yang menggunakan data tiga tahun terakhir (2004, 2005 dan 2006) untuk proses kalibrasi, kemudian sisa panjang data (2003) digunakan untuk tahapan verifikasi.

Selama proses kalibrasi maju maupun kalibrasi mundur dilakukan, perlu adanya pengecekan kriteria statistik yaitu  $R^2$  dan bias sebagai indikator baik atau tidaknya hasil kalibrasi yang dihasilkan.

Selain melihat nilai  $R^2$  dan bias, untuk mengontrol nilai parameter yang dihasilkan pada tahap kalibrasi, maka parameter yang

dihasilkan disesuaikan *rangennya* berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Sriwongsitanon dan Taesombat (2011).

Adapun *range* parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. *Range* Parameter Model IHACRES

Parameter Model	<i>Range</i> Parameter Model
Keseimbangan massa ( c )	0,003 – 0,011
Modulasi temperatur (f)	1 – 9
Laju pengeringan pada saat suhu referensi ( $\tau_w$ )	1 – 9
Konstanta waktu respon cepat ( $\tau_q$ )	0,5 – 15
konstanta waktu respon lambat ( $\tau_s$ )	2 – 200
Volume perbandingan untuk aliran lambat ( $v_s$ )	0,02 – 0,95

(Sumber: Sriwongsitanon dan Taesombat, 2011)

### 4. Verifikasi Model

Verifikasi model menurut Pechlivanidis, *et al* (2011) merupakan suatu proses setelah tahap kalibrasi selesai dilakukan yang berfungsi untuk menguji kinerja model pada data diluar periode kalibrasi.

Kinerja model biasanya lebih baik selama periode kalibrasi dibandingkan dengan verifikasi, fenomena seperti ini disebut dengan divergensi model.

### 5. Simulasi Model

Simulasi model menurut Refsgaard (2000) merupakan upaya memvalidasi penggunaan model untuk memperoleh pengetahuan atau wawasan dari suatu realita dan untuk memperoleh perkiraan yang dapat digunakan oleh para pengelola sumberdaya air.

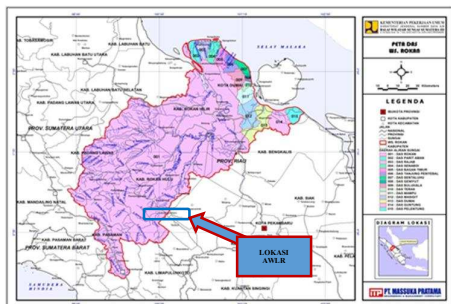
Tahap simulasi merupakan proses terakhir setelah proses kalibrasi dan verifikasi dilaksanakan. Dalam tahap ini keseluruhan data hujan dan temperatur digunakan sebagai data masukan untuk menghitung aliran.



## B. METODOLOGI PENELITIAN

### 1. Lokasi Penelitian

Lokasi pada penelitian ini adalah Sungai Rokan Sub-DAS Rokan Hulu Stasiun Lubuk Bendahara, Kecamatan Rokan IV Koto, Kabupaten Rokan Hulu, Provinsi Riau ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Sumber: Kementerian PU Republik Indonesia, 2014

### 2. Pengumpulan dan Pengolahan Data

Pengumpulan data pada penelitian ini didapat dari Balai Wilayah Sungai Sumatera III (BWSS III) Provinsi Riau Bagian Hidrologi di Kota Pekanbaru. Data yang diperoleh antara lain:

1. Data curah hujan harian stasiun hujan Lubuk Bendahara tahun 2003, 2004, 2005 dan 2006.
2. Data kilmatologi stasiun hujan Lubuk Bendahara tahun 2003, 2004, 2005 dan 2006.
3. Data debit harian dari AWLR stasiun Lubuk Bendahara DAS Rokan tahun 2003, 2004, 2005 dan 2006.

Sedangkan untuk data hujan satelit yang digunakan yaitu GsMaP\_MVK+ periode 1 Januari 2003 – 31 Desember 2006. Dipilih karena hanya GsMap\_MVK+ yang menyediakan data curah hujan harian tahun 2003, 2004, 2005 dan 2006. Data satelit ini diunduh menggunakan IFAS. Secara garis besar tahapan analisis yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- a. Menentukan skema yang berkaitan dengan pemilihan persentase panjang data yang digunakan dalam tahap kalibrasi, verifikasi dan simulasi. Adapun skema yang digunakan diperlihatkan pada Tabel 5.
- b. Melakukan *input* data ke program IHACRES v.2.1.2 dilakukan pengisian

periode kalibrasi dan durasi *warm up*. Pengisian periode kalibrasi disesuaikan dengan skema yang telah disusun sedangkan durasi *warm up* diisi secara bertingkat dengan kelipatan 100, untuk selanjutnya dilakukan proses kalibrasi.

- c. Melakukan keseluruhan proses kalibrasi untuk skema 1 dan *warm up* percobaan pertama (durasi 100) hingga diperoleh parameter dengan nilai  $R^2$  dan bias yang paling optimal. Nilai optimal untuk  $R^2$  mendekati satu dan bias mendekati nol.
- d. Mengulangi keseluruhan proses kalibrasi skema 1 untuk durasi *warm up* berikutnya (200, 300, 400,... dst). Proses ini berakhir apabila nilai  $R^2$  yang dihasilkan telah mengalami penurunan dibandingkan dengan durasi *warm up* sebelumnya.
- e. Mengulangi langkah nomor 5 hingga nomor 7 untuk skema 2 hingga 8.
- f. Verifikasi, yaitu suatu proses untuk menguji kinerja model pada data diluar periode kalibrasi. Proses verifikasi dilakukan dengan menggunakan variabel dan parameter yang memberikan nilai  $R^2$  yang tertinggi dalam tahap kalibrasi untuk masing – masing skema.
- g. Simulasi, yaitu proses terakhir setelah proses kalibrasi dan verifikasi dilaksanakan. Proses simulasi dilakukan dengan menggunakan variabel dan parameter yang sama yang digunakan dalam tahap verifikasi dan dihitung untuk masing – masing skema namun menggunakan keseluruhan data yang ada. Selanjutnya hasil simulasi masing – masing skema dihitung nilai  $R^2$ , Bias, R, VE dan CE.
- h. Proses validasi dilakukan dengan menggunakan variabel dan parameter yang dihasilkan masing – masing skema. Proses validasi ini dilakukan di stasiun duga air Pulau Berhalo. Selanjutnya hasil validasi dari masing – masing skema dihitung nilai  $R^2$  dan biasnya.
- i. Hasil dan pembahasan, yaitu membahas tentang hasil analisis data.

Tabel 5. Skema Persentase Panjang Data Tahap Kalibrasi, Verifikasi dan Simulasi Stasiun Duga Air Lubuk Bendahara

Skema	Kalibrasi	Verifikasi	Simulasi
1	75,017% (1-1-2003 – 31-12-2005)	24,983% (1-1-2006 – 31-12-2006)	
2	50,034% (1-1-2003 – 31-12-2004)	49,966% (1-1-2005 – 31-12-2006)	100% (1-1-2003 – 31-12-2006)
3	24,983% (1-1-2003 – 31-12-2003)	75,017% (1-1-2004 – 31-12-2006)	

## C. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Proses Pemodelan Debit dengan Metode IHACRES

Pada penelitian ini, proses kalibrasi dilakukan dengan program IHACRES v.2.1.2 untuk mendapatkan parameter dan variabel yang digunakan pada tahap selanjutnya (verifikasi dan simulasi). Proses verifikasi dan simulasi menggunakan bantuan *Microsoft Excel*. Adapun proses kalibrasi, verifikasi dan simulasi adalah sebagai berikut:

#### 1) Kalibrasi Model

Tabel 6. Nilai  $R^2$  dan Bias Kalibrasi Skema 1 Data Hujan Lapangan

<i>Warm Up</i>	100	200	300	400	500	600
Kalibrasi Maju						
$R^2$	0,464	0,507	0,529	0,560	0,617	,597
Bias	79,694	48,992	97,022	194,106	128,640	152,501
Kalibrasi Mundur						
$R^2$	0,564	0,564	0,564	0,575	0,609	0,597
Bias	76,018	75,622	75,619	76,855	15,135	89,609

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2014)

Berdasarkan hasil kalibrasi maju dan kalibrasi mundur yang diperoleh, maka hasil kalibrasi maju lebih baik, yakni  $R^2$  sebesar 0,617 dan 0,609 untuk kalibrasi mundur. Nilai bias hasil kalibrasi mundur memiliki nilai sebesar 15,135 mm/tahun dan kalibrasi maju nilai biasanya 128,640 mm/tahun. Penentuan hasil kalibrasi yang

Proses kalibrasi dilakukan dengan program IHACRES v.2.1.2. Adapun hasil nilai  $R^2$  dan bias pada tahap kalibrasi dengan variasi *warm up* untuk masing-masing skema ditunjukkan pada Tabel 4 berikut. Hasil kalibrasi data hujan lapangan dengan cara yang maju maupun mundur yang paling optimum pada *warm up* 500. Nilai  $R^2$  dan bias pada skema 1 kalibrasi maju dan mundur data hujan lapangan dengan variasi *warm up* ditampilkan pada Tabel 6 berikut:

digunakan pada tahapan verifikasi dan simulasi dipilih berdasarkan nilai  $R^2$  yang optimum antara kalibrasi maju dan mundur. Sehingga parameter dan variabel hasil kalibrasi maju yang digunakan dalam perhitungan debit harian dengan metode IHACRES. Parameter dan variabel ditampilkan pada Tabel 7 dan Tabel 8 berikut:

Tabel 7. Parameter Kalibrasi Maju Skema 1 Data Hujan Lapangan

Parameter Hasil Kalibrasi	500	Range Parameter
<i>Non Linear Module</i>		
Keseimbangan massa ( c )	0,004697	0,003 - 0,011
Laju pengeringan pada saat suhu referensi ( $\tau_w$ )	7,000	1 - 9
Modulasi temperatur (f)	1,000	1 - 9
<i>Linear Module</i>		
Konstanta waktu respon lambat ( $\tau^{(s)}$ )	27,600	2 - 200
Konstanta waktu respon cepat ( $\tau^{(q)}$ )	2,014	0,5 - 15
Volume perbandingan untuk aliran lambat ( $v^{(s)}$ )	0,837	0,02 – 0,95

Tabel 8. Variabel Kalibrasi Maju Skema 1 Data Hujan Lapangan

Variabel	500
Temperatur referensi ( $t_r$ )	34,000
Indeks ambang batas kelembaban tanah untuk menghasilkan aliran ( $l$ )	0,000
Respon jangka waktu non linear ( $p$ )	1,000
Angka resesi untuk aliran lambat ( $\alpha^{(s)}$ )	-0,964
Angka resesi untuk aliran cepat ( $\alpha^{(q)}$ )	-0,609
Respon puncak untuk aliran lambat ( $\beta^{(s)}$ )	0,030
Respon puncak untuk aliran cepat ( $\beta^{(q)}$ )	0,064
Volume perbandingan untuk aliran cepat ( $v^{(q)}$ )	0,163

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2014)

Kalibrasi yang menggunakan data hujan satelit ini, proses kalibrasinya sama dengan proses kalibrasi menggunakan data hujan lapangan. Hasil nilai  $R^2$  dan bias pada

tahap kalibrasi data hujan satelit dengan variasi *warm up* ditunjukkan pada Tabel 9 berikut:

Tabel 9 Nilai  $R^2$  dan Bias Kalibrasi Skema 1 Data Hujan Satelit

<i>Warm Up</i>	100	200	300	400	500	600
Kalibrasi Maju						
$R^2$	0,155	0,189	0,351	0,660	0,706	0,697
Bias	369,962	394,301	6,990	150,995	116,186	119,702
Kalibrasi Mundur						
$R^2$	0,525	0,526	0,526	0,566	0,606	0,594
Bias	169,597	163,595	163,595	130,264	90,993	93,905

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2014)

Hasil kalibrasi skema 1 data hujan satelit secara maju atau mundur berdasarkan Tabel 9 yang paling optimal yakni dengan *warm up* 500. Hasil kalibrasi maju dan kalibrasi mundur yang telah diperoleh, maka hasil kalibrasi maju lebih baik, yakni  $R^2$  dengan nilai 0,706 dan bias dengan nilai 116,186 mm/tahun. Hasil kalibrasi mundur  $R^2$  dengan nilai 0,606 dan bias bernilai 90,993 mm/tahun. Kalibrasi maju memiliki tingkat kesesuaian antara

debit terukur dan model lebih baik dibandingkan dengan kalibrasi mundur berdasarkan nilai  $R^2$ .

Sehingga parameter dan variabel kalibrasi maju yang digunakan untuk verifikasi dan simulasi skema 1. Untuk tahapan kalibrasi skema 2 dan skema 3 selanjutnya menggunakan kalibrasi secara maju. Nilai parameter dan variabel tersebut ditampilkan pada Tabel 10 dan Tabel 11 berikut:

Tabel 10. Parameter Kalibrasi Maju Skema 1 Data Hujan Satelit

Parameter Hasil Kalibrasi	500	Range Parameter
<i>Non Linear Module</i>		
Keseimbangan massa ( $c$ )	0,004143	0,003 - 0,011
Laju pengeringan pada saat suhu referensi ( $\tau_w$ )	9,000	1 - 9
Modulasi temperatur (f)	1,000	1 - 9
<i>Linear Module</i>		
Konstanta waktu respon lambat ( $\tau^{(s)}$ )	18,582	2 - 200
Konstanta waktu respon cepat ( $\tau^{(q)}$ )	1,812	0,5 - 15
Volume perbandingan untuk aliran lambat ( $v^{(s)}$ )	0,749	0,02 - 0,95

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2014)



Tabel 11. Variabel Kalibrasi Maju Skema 1 Data Hujan Lapangan

Variabel	500
Temperatur referensi ( $t_r$ )	34,000
Indeks ambang batas kelembaban tanah untuk menghasilkan aliran ( $l$ )	0,000
Respon jangka waktu non linear ( $p$ )	1,000
Angka resesi untuk aliran lambat ( $\alpha^{(s)}$ )	-0,948
Angka resesi untuk aliran cepat ( $\alpha^{(q)}$ )	-0,576
Respon puncak untuk aliran lambat ( $\beta^{(s)}$ )	0,039
Respon puncak untuk aliran cepat ( $\beta^{(q)}$ )	0,106
Volume perbandingan untuk aliran cepat ( $v^{(q)}$ )	0,251

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2014)

Adapun hasil nilai  $R^2$  dan bias pada untuk skema 2 dan skema 3 ditunjukkan tahap kalibrasi dengan variasi *warm up* pada Tabel 12 berikut:

Tabel 12. Nilai  $R^2$  dan Bias dengan Variasi *Warm Up* Masing – Masing Skema

Uji Statistik	Data Hujan Lapangan		Data Hujan Satelit	
	Skema 2	Skema 3	Skema 2	Skema 3
	200	100	500	900
$R^2$	0,508	0,315	0,806	NaN
Bias	-15,541	65,061	186,674	NaN

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2014)

Tabel 13. Parameter Hasil Kalibrasi Masing – Masing Skema

Parameter Hasil Kalibrasi	Data Hujan Lapangan		Data Hujan Satelit		Range Parameter
	Skema 2	Skema 3	Skema 2	Skema 3	
<b>Non Linear Module</b>					
Keseimbangan massa (c)	0,006674	0,004310	0,004182	0,000000	0,003-0,011
Laju pengeringan pada saat suhu referensi ( $\tau_w$ )	8,000	9,000	9,000	0,000	1-9
Modulasi temperatur (f)	1,000	4,500	1,000	0,000	1-9
<b>Linear Module</b>					
Konstanta waktu respon lambat ( $\tau^{(s)}$ )	198,005	630,493	12,854	0,000	2-200
Konstanta waktu respon cepat ( $\tau^{(q)}$ )	4,159	5,345	1,864	0,000	0,5-15
Volume perbandingan untuk aliran lambat ( $v^{(s)}$ )	0,671	0,790	0,568	0,000	0,02-0,95

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2014)

Tabel 14. Variabel Masing – Masing Skema

Variabel	Data Hujan Lapangan		Data Hujan Satelit	
	Skema 2	Skema 3	Skema 2	Skema 3
Temperatur referensi ( $t_r$ )	32,000	34,000	34,000	0,000
Indeks ambang batas kelembaban tanah untuk menghasilkan aliran ( $l$ )	0,000	0,000	0,000	0,000
Respon jangka waktu non linear ( $p$ )	1,000	1,000	1,000	0,000
Angka resesi untuk aliran lambat ( $\alpha^{(s)}$ )	-0,995	-0,998	-0,925	0,000
Angka resesi untuk aliran cepat ( $\alpha^{(q)}$ )	-0,786	-0,829	-0,585	0,000
Respon puncak untuk aliran lambat ( $\beta^{(s)}$ )	0,003	0,001	0,042	0,000
Respon puncak untuk aliran cepat ( $\beta^{(q)}$ )	0,070	0,036	0,179	0,000
Volume perbandingan untuk aliran cepat ( $v^{(q)}$ )	0,329	0,210	0,432	0,000

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2014)

Pada Tabel 12 memberikan pemahaman bahwa variasi *warm up* yang memberikan nilai  $R^2$  optimal untuk masing – masing skema tidaklah sama, sehingga

dari *warm up* dengan  $R^2$  optimal tersebut memberikan parameter hasil kalibrasi dan variabel seperti yang ditampilkan pada Tabel 13 dan Tabel 14. Selanjutnya

parameter hasil kalibrasi dan variabel tersebut digunakan untuk perhitungan debit harian dengan metode IHACRES untuk tahap verifikasi dan simulasi pada masing – masing skema.

## 2) Verifikasi Model

Setelah parameter hasil kalibrasi dan variabel diperoleh, selanjutnya dilakukan perhitungan debit harian untuk masing – masing skema dengan metode IHACRES. Adapun panjang data yang digunakan dalam tahap ini, disesuaikan dengan persentase panjang data pada tahap verifikasi untuk masing – masing skema.

## 3) Simulasi Model

Pada simulasi model, parameter dan variabel yang akan digunakan dalam

perhitungan sama dengan parameter dan variabel yang digunakan dalam verifikasi masing – masing skema, namun dalam perhitungannya menggunakan keseluruhan data yang ada yaitu data dari tanggal 1 Januari 2003 sampai 31 Desember 2006.

## 2. Perbandingan *output* IHACRES Data Hujan Lapangan dan Satelit dengan *output* IFAS

Hasil perbandingan evaluasi simulasi pemodelan hujan-aliran program IHACRES dengan data hujan lapangan dan data hujan satelit pada penelitian ini ditampilkan pada Tabel 15. Berdasarkan Tabel 15, secara umum penggunaan data hujan satelit pada pemodelan IHACRES lebih baik.

Tabel 15. Hasil Evaluasi Simulasi Pemodelan Hujan-Aliran Program IHACRES Data Hujan Lapangan dan Satelit

Panjang Data	Pemodelan Hujan-Aliran	Parameter Evaluasi			Penjelasan
		Korelasi (R)	Selisih Volume (VE)	Koefisien Efisiensi (CE)	
DATA HUJAN LAPANGAN					
Skema 1	IHACRES	0,642	16,630%	0,659	Kurang optimal karena nilai VE > 5% dan CE dikategorikan cukup efisien
DATA HUJAN SATELIT					
Skema 1	IHACRES	0,533	6,821%	0,924	Cukup optimal karena nilai VE > 5%, tetapi telah mendekati <i>range</i> dan dikategorikan sangat efisien
DATA HUJAN LAPANGAN					
Skema 2	IHACRES	0,569	1,071%	0,715	Cukup optimal karena nilai VE < 5% dan CE mendekati <i>range</i> sangat efisien
DATA HUJAN SATELIT					
Skema 2	IHACRES	0,559	28,762%	0,875	Kurang optimal karena nilai VE > 5% dan CE dikategorikan sangat efisien
DATA HUJAN LAPANGAN					
Skema 3	IHACRES	0,495	33,218%	1,033	Kurang optimal karena nilai VE > 5% dan CE dikategorikan sangat efisien
DATA HUJAN SATELIT					
Skema 3	IHACRES	0	0	0	Simulasi tidak berhasil

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2014)

## 3. Perbandingan *Output* IHACRES Data Hujan Lapangan dengan *Output* IFAS Data Hujan Satelit

Hasil perbandingan evaluasi simulasi pemodelan hujan-aliran program IHACRES

dengan data hujan lapangan dengan IFAS data hujan satelit pada penelitian ini ditampilkan pada Tabel 16. Berdasarkan Tabel 16, secara umum penggunaan data

hujan satelit pada pemodelan IFAS lebih baik, berdasarkan koefisien efisiensi (CE).

Tabel 16. Hasil Evaluasi Simulasi Pemodelan Hujan-Aliran Program IHACRES Data Hujan Lapangan dengan IFAS Data Hujan Satelit

Panjang Data	Pemodelan Hujan-Aliran	Parameter Evaluasi			Penjelasan
		Korelasi (R)	Selisih Volume (VE)	Koefisien Efisiensi (CE)	
DATA HUJAN LAPANGAN					
Skema 1	IHACRES	0,642	16,630%	0,659	Kurang optimal karena nilai R dikategorikan berhubungan substansial, nilai VE > 5% dan CE dikategorikan cukup efisien
DATA HUJAN SATELIT					
Empat tahun	IFAS	0,250	9,443%	1,652	Cukup optimal meskipun nilai R berkorelasi rendah karena nilai VE > 5% telah mendekati <i>range</i> dan CE dikategorikan sangat efisien
DATA HUJAN LAPANGAN					
Skema 2	IHACRES	0,569	1,071%	0,715	Cukup optimal karena nilai VE < 5% dan CE dikategorikan cukup efisien tetapi telah mendekati <i>range</i> sangat efisien
DATA HUJAN SATELIT					
Empat tahun	IFAS	0,250	9,443%	1,652	Kurang optimal karena nilai VE > 5%, tetapi CE dikategorikan sangat efisien
DATA HUJAN LAPANGAN					
Skema 3	IHACRES	0,495	33,218%	1,033	Kurang optimal karena nilai VE > 5%, tetapi CE dikategorikan sangat efisien
DATA HUJAN SATELIT					
Empat tahun	IFAS	0,250	9,443%	1,652	Cukup optimal meskipun nilai R berkorelasi rendah karena nilai VE > 5% tetapi mendekati <i>range</i> dan CE dikategorikan sangat efisien

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2014)

#### 4. Perbandingan Output IHACRES Data Hujan Satelit dengan Output IFAS Data Hujan Satelit

Hasil perbandingan evaluasi simulasi pemodelan hujan-aliran program IHACRES dengan data hujan satelit dan IFAS dengan data hujan satelit pada penelitian ini ditampilkan pada Tabel 17. Berdasarkan Tabel 17, secara umum penggunaan data hujan satelit pada pemodelan IFAS lebih baik.

Hal ini terjadi karena data satelit merupakan suatu data yang terdistribusi penuh menggambarkan proses hidrologi. Ketidakberhasilan pemodelan

menggunakan *grid* atau *pixel* (*picture element*). Suatu *grid* atau kotak segiempat, pada prinsipnya adalah idealita yang menggambarkan satuan luas terkecil yang digunakan untuk pemodelan, yang diartikan hujan satelit diukur hanya pada batasan Sub-DAS. Sedangkan data hujan lapangan merupakan hujan rerata wilayah yang mana lokasi stasiun hujan berada di luar batasan Sub-DAS. Data hujan lapangan pada penelitian ini hanya menggunakan satu stasiun hujan dengan menganggap curah hujan pada Sub-DAS seragam.

IHACRES menggunakan data hujan satelit skema 3 ini sulit untuk dianalisis lebih dalam. Karena pemodelan ini juga sering mengasumsikan DAS sebagai kotak hitam (*black box*).

Model ini hanya didasarkan pada analisis *input* dan *output* dari sistem DAS, tidak berusaha untuk lebih dalam mengamati yang terjadi di dalam DAS tersebut.

Tabel 17. Hasil Evaluasi Simulasi Pemodelan Hujan-Aliran Program IHACRES Data Hujan Satelit dengan IFAS Data Hujan Satelit

Panjang Data	Pemodelan Hujan-Aliran	Parameter Evaluasi			Penjelasan
		Korelasi (R)	Selisih Volume (VE)	Koefisien Efisiensi (CE)	
DATA HUJAN SATELIT					
Skema 1	IHACRES	0,533	6,821%	0,924	Cukup optimal karena nilai R dikategorikan hubungan substansial, nilai VE > 5% tetapi telah mendekati <i>range</i> VE < 5% dan CE sangat efisien
DATA HUJAN SATELIT					
Empat tahun	IFAS	0,250	9,443%	1,652	Cukup optimal meskipun nilai R berkorelasi rendah karena nilai VE > 5% telah mendekati <i>range</i> dan CE dikategorikan sangat efisien
DATA HUJAN SATELIT					
Skema 2	IHACRES	0,559	28,762%	0,875	Kurang optimal karena nilai VE > 5% dan CE dikategorikan sangat efisien
DATA HUJAN SATELIT					
Empat tahun	IFAS	0,250	9,443%	1,652	Cukup optimal meskipun nilai R berkorelasi rendah karena nilai VE > 5%, tetapi CE dikategorikan sangat efisien
DATA HUJAN SATELIT					
Skema 3	IHACRES	0	0	0	Simulasi tidak berhasil
DATA HUJAN SATELIT					
Empat tahun	IFAS	0,250	9,443%	1,652	Cukup optimal meskipun nilai R berkorelasi rendah karena nilai VE > 5% tetapi mendekati <i>range</i> dan CE dikategorikan sangat efisien

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2014)

#### D. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan maka dapat diambil beberapa kesimpulan, antara lain adalah:

1. Penggunaan data curah hujan satelit untuk pemodelan hidrologi hujan-aliran IHACRES lebih baik, jika dibandingkan pemodelan hidrologi hujan-aliran IHACRES menggunakan data curah hujan lapangan berdasarkan evaluasi ketelitian model koefisien efisiensi (CE).

Hal ini ditinjau dengan menilai parameter CE yang memiliki nilai lebih baik, sedangkan parameter R dan VE memiliki hasil yang relatif sama.

2. Secara umum dari parameter evaluasi ketelitian tahap simulasi, pemodelan hidrologi hujan-aliran IFAS yang menggunakan data hujan satelit lebih andal dibandingkan pemodelan hidrologi hujan-aliran IHACRES yang

menggunakan data hujan lapangan dan satelit.

3. Semakin panjang data yang digunakan, maka tingkat akurasi kinerja model hidrologi hujan-aliran IHACRES yang dihasilkan akan semakin baik, sebaliknya semakin pendek data yang digunakan, maka tingkat akurasi kinerja model hidrologi hujan-aliran IFAS yang dihasilkan akan semakin baik.

#### E. Saran

Adapun saran yang didapat dari penelitian ini adalah:

1. Dalam penentuan nilai parameter kalibrasi IHACRES harus lebih teliti agar hasil yang diperoleh lebih baik.
2. Menggunakan data hujan lapangan dan data hujan satelit yang lebih panjang dalam pemodelan hidrologi hujan-aliran IHACRES.

#### F. DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, R.M. & Goodall, J.L. 2006. Regionalization of IHACRES model parameters for integrated assessment across the Lake Erie, northern Ohio basin USA. *Proceedings of the 3rd Biennial Meeting of the International Environmental Modeling and Software Society (iEMSs)*. Burlington, Vermont, 2006.
- Carlile, P.W., Croke, B.F.W., Jakeman, A.J. & Lees, B.G. 2004. Development of a semidistributed catchment hydrology model for simulation of land-use change streamflow and groundwater recharge within the Little river catchment. In I.C. Roach (ed.). *Regolith*, 2004. CRC LEME: 54–56.
- Croke, B.F.W, Andrews, F., Jakeman, A.J., Cuddy, S. & Luddy, A. 2005. Redesign of the IHACRES Rainfall-Runoff. Makalah dalam *29<sup>th</sup> Hydrology and Water Resources Symposium*. Canberra, 21 – 23 Februari 2005.
- Croke, B.F.W., Andrews, F., Spate, J. & Cuddy, S. 2005. *IHACRES User Guide*. Australia: ICAM Centre dan The Australian National University.
- Croke, B.F.W. & Littlewood, I.G. 2005. Comparison of Alternative Loss Modules in the IHACRES Model: An Application to 7 Catchments in Wales. *International Congress on Modeling and Simulation Society of Australia and New Zealand*. Melbourne, Australia 2005.
- Dye, P.J. & Croke, B.F.W. 2003. Evaluation of Streamflow Predictions by the IHACRES Rainfall-Runoff Model in Two South African Catchments. *Environ. Mod and Soft.* 18 : 705-712.
- Hambali, R. 2008. *Analisis Ketersediaan Air dengan Model Mock*. Bahan Ajar. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Harto, S. 1993. *Analisis Hidrologi*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Indarto. 2006. *Kalibrasi Model IHACRES untuk Simulasi Neraca Air Harian di DAS Bedadung, Jawa Timur, Indonesia*. *Media Teknik Sipil*. Juli 2006: 111-122.
- Indarto. 2010. *Hidrologi Dasar Teori dan Contoh Aplikasi Model Hidrologi*. Jakarta : Bumi Aksara
- Mardhotillah, Mutia. 2013. *Pemodelan Hujan-aliran Daerah Aliran Sungai Rokan Dengan Menggunakan Data Penginderaan*. Skripsi S-1. Program Studi Teknik Sipil, FT-Universitas Riau.
- Motovilov, Y.G., Gottschalk, L., Engeland, K. & Rodhe, A. 1999. Validation of a Distributed Hydrological Model Against Spatial Observations. *Elsevier Agricultural and Forest Meteorology*. 98: 257-277.
- Pechlivanidis, I.G., Jackson, B.M., McIntyre, N.R., & Wheeler, H.S. 2011. Catchment Scale Hydrological Modelling: A Review of Model Types, Calibration



- Approaches and Uncertainty Analysis Methods in the Context of Recent Developments in Technology and Applications. *Global Nest Journal*. 13: 193–214.
- Refsgaard, J.C. 2000. Towards a Formal Approach to Calibration and Validation of Models Using Spatial Data, Dalam R. Grayson & G. Blöschl. *Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling*. Cambridge University Press, Cambridge, 329 – 354.
- Sriwongsitanon, N. & Taesombat, W, 2011. Estimation of the IHACRES Model Parameters for Flood Estimation of Ungauged in the Upper Ping River Basin. *Kasetsart J (Nat. Sci.)* 45. Juni 2011: 917-931.
- Wheater, H., Sorooshian, S. & Sharma, K.D. 2008. *Hydrological Modelling in Arid and Semi – Arid Areas*. Cambridge: Cambridge University Press.